

# 激光离散淬火基体 - 涂层的接触破坏行为

吴臣武, 张 坤, 陈光南

(中国科学院力学研究所)

**[摘 要]** 针对激光离散淬火基体涂层的接触破坏行为, 本文以圆柱压头对预淬火区、间隙区及原始基体上方的涂层进行法向接触, 比较研究了三种情形下涂层及界面变形、断裂行为。试验研究结果表明, 激光离散淬火基体 - 涂层体系的涂层开裂和界面变形程度明显低于原始基体 - 涂层体系, 激光离散淬火基体显著增强了涂层抵抗法向接触破坏的能力。数值计算结果表明, 激光离散淬火基体能降低涂层内拉应力及界面法向应力, 减少涂层开裂和界面剥离的可能性。

**[关键词]** 激光离散淬火; 基体; 涂层; 接触; 界面

**[中图分类号]** TG665 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001 - 1560(2008)增刊 - 0080 - 04

**Abstract:** To investigate the contact behavior of the coating on a substrate discretely as - quenched by laser, a cylindrical indenter is loaded at the coating on the as - quenched region, intermediate region and origin substrate and the fracture behaviors of the coating etc are compared. The experimental results show that the reliability of the coating under contact is reinforced greatly by the discretely as - quenched substrate. The numerical simulation results show that the tensile stresses in coating and the interfacial normal stresses are reduced by the discretely as - quenched substrate and the possibilities of the fracture of both the coating and substrate shall be depressed.

**Key words:** laser discretely quench, substrate, coating, contact, interface

## 0 前 言

针对软基体/硬涂层体系在接触载荷作用下的大量研究表明, 基体和涂层在变形刚度上的失配, 是导致涂层/基体界面产生破坏的主导因素。若能缓解界面附近的涂层/基体的刚度失配, 就能显著提高涂层/基体体系的承载能力<sup>[1-2]</sup>, 这就催生了所谓的复合表面技术<sup>[3-5]</sup>。复合表面技术就是通过对基体进行强化预处理(如渗氮、渗碳等)来提高基体对涂层的支撑能力。Yongqing Fu, Jun Wei, Bibo Yan 和 Nee Lam Loh 通过划痕试验和压痕试验研究发现, Ti - 6Al - 4V 基体经过等离子体渗氮处理然后镀覆氮化碳涂层, 相比未处理的 Ti - 6Al - 4V 基体而言, 其承载能力得到了大幅度提高<sup>[6]</sup>。Bojan Podgornik 和 Joze Vizintin 研究发现 AISI 4140 钢基体经过等离子体渗氮处理后再镀覆 DLC 涂层, 能显著提高结构表层的承载能力<sup>[7]</sup>。

若在镀覆涂层之前, 以激光对基体进行周期性离散淬火, 淬火马氏体组织及大量位错<sup>[8]</sup>的存在将提高基体淬火区域的硬度, 从而增强基体表层对涂层的支撑能力。然而由于基体表层淬火的离散特征, 当接触载荷作用在淬火区之间的间隙区上方时, 这种淬火的支撑能力强化作用是否存在呢?

本章首先通过压入试验, 以圆柱形压头压入两种试样(基体激光淬火和无激光淬火)、三个典型的位置来研究激光淬火基体涂层在不同区域承受相同压入载荷时的变形及破坏行为。然后, 以有限元法模拟分析了三种情形试样的压入变形行为, 及界面应力分布特征。

## 1 试验及结果分析

### 1.1 试样及试验方法

首先以 CO<sub>2</sub> 激光器对 30CrNi2MoVA 钢基体进行激光离散扫描淬火, 处理参数为  $P \approx 450\text{W}$ , 光斑直径  $D \approx 3 - 4\text{mm}$ , 扫描速度  $v \approx 22.4 - 28.2\text{mm/s}$ , 周期宽度

**[收稿日期]** 2008 - 05 - 11

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(NO. 50471087, NO. 50531060)

$W_p \approx 5\text{mm}$ 。然后在基体表面镀铬,厚度为  $100 \sim 300\mu\text{m}$ 。最后线切割制备试样并进行初步打磨显示激光淬火区,并得到试样尺寸为  $30\text{mm} \times 14\text{mm} \times 5\text{mm}$ ,如图1<sup>[9]</sup>所示。作为对比,同时制备了相同尺寸的均质(无淬火)基体的镀铬试样。

压入试验在本实验室自行研制的涂层万能试验机上完成:试样水平放置在载物台上,以直径为  $12\text{mm}$  的圆柱形压头(轴向长度  $> 14\text{mm}$ ),轴线平行于淬火带扫描方向对涂层施加准静态压入载荷。加载速率控制方程为  $\frac{dL}{dt} = 0.001 \text{ mm/s}$ ,这里  $L$  指压入法向变形, $t$  指时间。

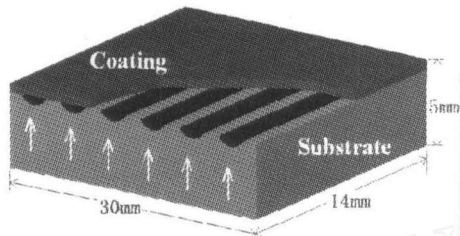


图1 涂层体系示意图

## 1.2 试验结果分析

压入载荷-变形曲线如图2所示,其中2(a)、(b)和(c)分别对应压头压入位置在淬火区中心(Case 1)、(两条淬火带之间的)间隙区中心(Case 2)和均质基体(Case 3)三种情形。

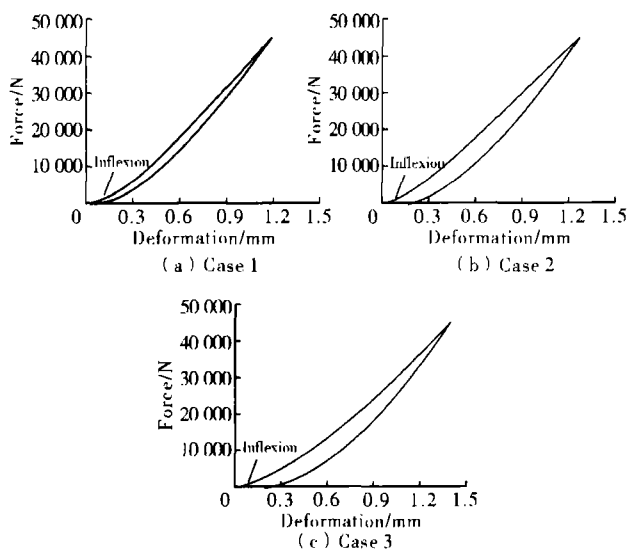


图2 (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 的载荷-变形曲线

在三种情形的载荷(力)-变形曲线中,在起始部位附近都可以观察到一个明显的转折区域(Inflexion)。这可能是因为涂层开裂而导致其对结构总体变形刚度

的贡献降低,结构的压入变形刚度在该区域附近发生较明显的变化,从而在载荷-位移曲线上形成类似于拐点的区域。在转折区域以后,压入淬火区(Case 1)的载荷曲线与压入均质无淬火基体(Case 3)试样的载荷曲线,都与均值基体-涂层的压入载荷曲线类似;而压入间隙区(Case 2)的载荷曲线呈现出略微不同的变化趋势。这可能是因为淬火区(宽  $5\text{mm}$ )比较宽,在当前的载荷作用下,基体的变形还没有受到淬火区边界的显著影响,因此其压入行为更接近单一基体材料行为;而间隙区(宽  $1\text{mm}$ )比较窄,其变形将受到两侧的淬火区约束作用而呈现出与单一材料基体所略微不同的压入行为。在  $45000\text{N}$  压入力作用下,压入淬火区(Case 1)、压入间隙区(Case 2)和压入均匀无淬火基体(Case 3)试样的最大压入深度分别为  $1.19\text{mm}$ ,  $1.26\text{mm}$  和  $1.41\text{mm}$ ,残余压坑深度分别为  $0.07\text{mm}$ ,  $0.15\text{mm}$  和  $0.18\text{mm}$ 。压入淬火区和间隙区的最大位移分别为压入均质无淬火的基体试样最大位移的  $84\%$  和  $89\%$ ,压入淬火区和间隙区的残余压坑深度分别为压入均质无淬火的基体试样残余压坑深度的  $42\%$  和  $83\%$ 。可见,压头压在淬火区涂层上时,变形刚度最大、残余变形最小。压头压在间隙区涂层上时,由于两侧邻近的淬火区的存在,其变形刚度仍然明显高于均质无淬火基体的情形。

图3(a)、(b)和(c)分别给出了三种情形压入以后,典型裂纹形貌。其中图3(a)显示的是压入淬火区时涂层内一条垂直裂纹扩展到界面附近的裂尖形貌;图3(b)显示的是压入间隙区时涂层内一条垂直裂纹扩展到界面附近的裂尖形貌;图3(c)显示的是压入均质无淬火基体试样时涂层内一条垂直裂纹扩展到界面附近的裂尖形貌。可见,基体激光周期淬火试样界面附近的变形程度远远低于均质无淬火基体的试样。这说明,基体周期淬火区域提高了基体对涂层的支撑作用。

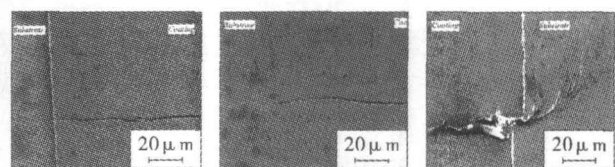


图3 界面附近典型裂纹尖端形貌

## 2 数值计算模型及结果分析

2.1 计算模型及条件

为了研究试样压入时的应力 - 变形场,可以有限元法模拟前文所述的三种压入加载(Case1、Case2 和 Case3)过程。由于结构只在垂直于压头轴线方向具有周期性,且载荷近似均匀的分布在平行于压头轴线的方向,因此采用如图 4 所示的平面应变模型进行计算,其中 4(a)显示的是几何模型,(b),(c)和(d)分别显示的是压入淬火区、间隙区和均质无淬火基体时的网格图。这种平面应变模型对于远离自由端面区域的压入行为是比较接近的(虽然如此,本章还是在附录上列举了三维模型分析结果进行比照)。同时考虑到试样宽度远大于接触区域宽度,因此可以采用如图 4 所示的对称的半模型进行分析。则在压头和试样的对称轴(x=0)上有如下对称约束条件  $U_y=0$ 。

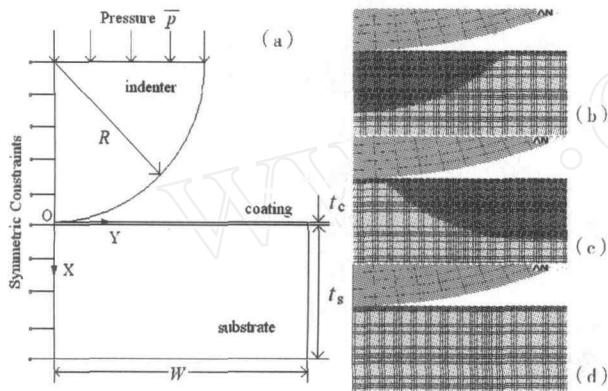


图 4 (a) 计算模型、载荷及约束(b)case1、(c)case2、(d)case3 网格图

同时,该多体接触模型具有两类界面,第一类是完全连接的界面,包括涂层/基体(淬火区和间隙区)界面及淬火区与非淬火区的界面。对于这类界面,其界面连续条件包括应力连续方程  $\sigma_n^+ = \sigma_n^-$  和  $\sigma_\tau^+ = -\sigma_\tau^-$ , 以及位移连续方程  $u_n^+ = u_n^-$  和  $u_\tau^+ = -u_\tau^-$ , 这里  $\sigma$  表示边界应力,  $n$  表示法向,  $\tau$  表示切向,  $u$  表示位移, “+”和“-”分别表示接触对的两个材料点。第二类界面为允许相对滑动的接触界面,即压头与试样表面的接触界面,采用库仑摩擦模型,则其接触边界满足应力约束方程  $\sigma_n^+ = \sigma_n^-$ ,  $\sigma_\tau^+ = k\sigma_n^-$  (k 取 0.1, 为摩擦系数), 以及位移约束方程  $u_n^+ = u_n^-$ 。

2.2 计算结果及分析

图 5 显示,加载时,三种情形的涂层内应力分量  $\sigma_{yy}$  的分布规律大致相似:在压头 - 涂层接触区域内涂层外表面一般处于不均匀的压缩应力状态,接触区域边缘附近涂层外表面出现较高的拉伸应力状态,致使

涂层在接触区(压坑)边缘开裂;而涂层内表面(靠近界面)附近大都处于不均匀的拉伸应力状态,这种拉伸应力曲线具有多个极值点,可能导致涂层内表面出现多重开裂。压入淬火区时(Case1)涂层压缩应力覆盖区域最大、拉伸应力峰值最低(< 400MPa),压入均质无淬火基体试样时(Case3)涂层拉伸应力区域覆盖最大、拉伸应力峰值最高(> 600MPa)。这意味着,加载阶段压入均质无淬火基体试样(Case3)时涂层更容易开裂。

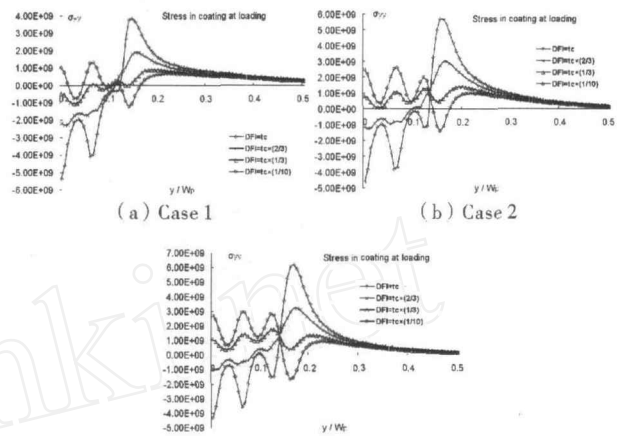


图 5 加载时涂层应力  $\sigma_{yy}$

图 6 表明,卸载后三种情形的涂层应力分量  $\sigma_{yy}$  的分布规律仍然相似:压坑及附近区域的大都处于不均匀的拉伸应力状态,拉伸应力曲线具有多个极值点,由于涂层的局部弯曲效应,导致在压坑内的涂层外表面和压坑边缘附近的涂层内表面存在小范围的压缩应力。且可见,Case1 的压缩应力覆盖区域最大、拉伸应力峰值( $\approx 350\text{MPa}$ )最小,而 Case3 的拉伸应力区域覆盖最大、拉伸应力峰值( $\approx 580\text{MPa}$ )最大,因此卸载时压入均质无淬火基体试样(Case3)时涂层仍然更容易开裂。

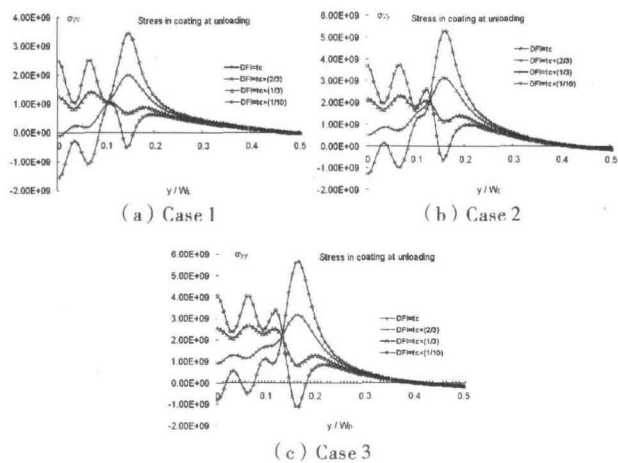


图 6 卸载后涂层应力  $\sigma_{yy}$

为了研究加载、卸载阶段界面法向应力的变化规律,可以作应力分量 $\sigma_x$ 在界面路径上的投影,可得界面法向应力分布曲线如图7所示。

由图7可见,加载时大部分区域都是压缩应力,但Case2和Case3在压坑边缘附近出现了比较明显的小范围界面法向拉伸应力区域。而Case2的界面法向拉伸应力水平又略低于Case3,这表明基体激光淬火将降低压坑边缘处界面出现加载拉伸破坏的可能性。同时,结果表明,卸载时,从压坑中心到边缘附近界面正应力呈现拉-压-拉-压的多重起伏变化,并且Case1、Case2和Case3的界面正应力覆盖区域依次增大、应力峰值依次升高。这表明在卸载时可能出现界面的多重拉伸破坏,且Case3萌生界面拉伸破坏的可能性最大。

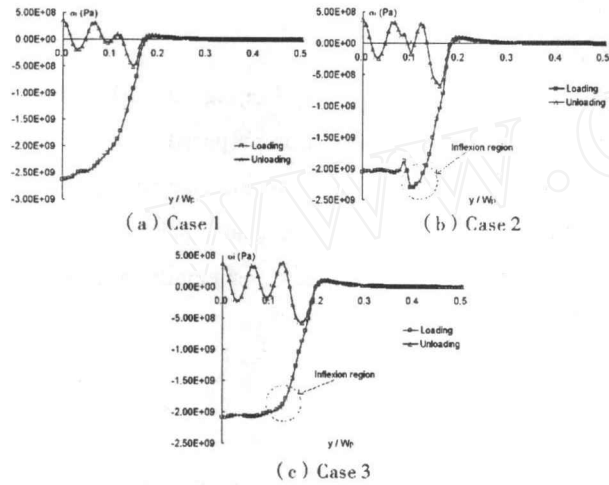


图7 界面法向应力

### 3 结论

压入试验结果表明,淬火区的存在,显著提高了基体对涂层的支撑能力。周期性淬火区起到了“桥墩”式支撑作用。即使是接触载荷作用在间隙区上方,由于淬火区的作用,也使得间隙区的塑性区减小、塑性功耗散降低。接触载荷作用在周期淬火基体的涂层上,比作用在均匀无淬火基体的涂层上,其涂层破坏及界面附近的破坏减少。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] HERZL CHAI. Fracture mechanics analysis of thin coatings under spherical Indentation. International Journal of Fracture, 2003, 119: 263 ~ 285.
- [ 2 ] Herzl Chai. Fracture mechanics analysis of thin coatings under plane - strain indentation. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40: 591 ~ 610.
- [ 3 ] T. Bell, H. Dong and Y. Sun. Realising the potential of duplex surface engineering. Tribology International, 1998, 31: 127 ~ 137.
- [ 4 ] 师昌绪,徐滨士,张平,刘世参. 21世纪表面工程的发展趋势. 中国表面工程, 2001, 14 (1): 2 ~ 7.
- [ 5 ] 马青松,徐可为. 用于机械工业的复合表面技术. 中国表面工程, 2003, 16 (6): 5 ~ 9.
- [ 6 ] Yongqing Fu, Jun Wei, Bibo Yan and Nee Lam Loh. Characterization and tribological evaluation of duplex treatment by depositing carbon nitride films on plasma nitrided Ti - 6Al - 4V. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, 2000, 35: 2215 ~ 2227.
- [ 7 ] Bojan Podgornik, Joze Vizintin. Influence of substrate treatment on the tribological properties of DLC coatings. Diamond and Related Materials, 2001, 10: 2232 ~ 2237.
- [ 8 ] 才庆魁,战效文,傅淑云,王维国. CO2激光辐照强化钢表面的机理. 东北工学院学报, 1987, 52: 330 ~ 334.
- [ 9 ] Kun Zhang, Chen - Wu Wu, Ying Hu, Guang - Nan Chen. The Design and Application of a Novel Duplex Coating Formed by Laser Pre - treatment. Solid State Phenomena, 2006, 118: 243 ~ 246.